第 38 卷第 7 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.7
2018 年 4 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Apr.,2018

DOI: 10.5846/stxb201704290787
元晓春, 杨景清,王铮, 袁硕, 杨舟然, 陈岳民, 杨玉盛.增温和施氮对亚热带杉木人工林土壤溶液养分的影响.生态学报,2018,38(7):2323-2332.
Yuan X C, Yang J Q,Wang Z,Yuan S, Yang Z R, Chen Y M, Yang Y S.The effects of warming and nitrogen addition on soil nutrients in the soil solutions from a subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation.Acta Ecologica Sinica,2018,38(7):2323-2332.

增温和施氮对亚热带杉木人工林土壤溶液养分的影响

元晓春[1,2],杨景清[1,2],王　铮[1,2],袁　硕[1,2],杨舟然[1,2],陈岳民[1,2,*],杨玉盛[1,2]
1 福州师傅大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,福州　350007
2 福建师范大学地理科学学院,福州　350007

摘要:在增温和氮沉降等气候变化背景下,土壤溶液养分元素供应是否平衡对加速或减弱土壤养分循环起着至关重要的作用。为探究增温和施氮对亚热带杉木人工土壤溶液养分动态的影响,分别于各样地的 0—15、15—30cm 和 30—60cm 土层安装土壤溶液采集器。利用真空泵的负压原理采集土壤溶液,对其有机组分及无机组分进行了两年的动态监测。结果显示:增温及增温+施氮显著增加了各土层溶解性总氮(DTN)及硝态氮(NO_3^-)浓度,而施氮促进了植被对其的大量吸收而未呈现显著的促进作用。整体而言,短期增温和施氮处理显著降低了可溶性有机碳(DOC)浓度,对土壤溶液 K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}等离子含量影响较小。但相比于施氮,增温对土壤溶液中矿质元素的影响远大于施氮。增温导致的土壤孔径增大,通透性增强可极大地促进 Fe^{3+}、Al^{3+}淋溶,同时导致表层 Na^+、Mg^{2+}离子含量显著降低。增温+施氮交互作用对土壤溶液各养分的影响存在叠加效应,但并不是增温和施氮单因子的简单累加,要深入了解土壤养分对未来气候变迁的内部机制需进一步长期监测。

关键词:增温;施氮;土壤溶液;养分动态

The effects of warming and nitrogen addition on soil nutrients in the soil solutions from a subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation

YUAN Xiaochun[1,2], YANG Jingqing[1,2], WANG Zheng[1,2], YUAN Shuo[1,2], YANG Zhouran[1,2], CHEN Yuemin[1,2,*], YANG Yusheng[1,2]
1 *Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology*, *Fujian Normal University*, *Fuzhou* 350007, *China*
2 *Institute of Geography*, *Fujian Normal University*, *Fuzhou* 350007, *China*

Abstract: Climate change can alter soils by causing warming and nitrogen deposition. It is not clear whether the nutrient supply balance in the soil solution plays an important role in accelerating or weakening soil nutrient cycling. The aim of this study was to analyze the effects of warming and nitrogen addition on nutrients in the soil solutions taken from a subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation. Soil solution collectors were installed at soil depths of 0—15, 15—30, and 30—60cm in every sample plot. The soil solutions were collected using the negative pressure supplied by a vacuum pump, and the dynamic changes to the organic and inorganic components were analyzed for two years. The results showed that warming and warming+N addition significantly inhibited the dissolved total nitrogen (DTN) and NO_3^- concentrations in all the soil layers, and N addition had no significant effect on them due to the increase in mass vegetation absorption of these nutrients. In general, the short-term treatments of warming and N addition significantly decreased the concentrations of dissolved organic carbon (DOC), but had little effect on the K^+, Ca^{2+}, Na^+, and Mg^{2+} concentrations in the soil solution. However, the effect of warming on the mineral elements in the soil solution was much greater than that of N addition. Warming increased

基金项目:国家自然科学基金项目(31670620, U1505233);福建省科技厅科技项目(2016R1032-2)
收稿日期:2017-04-29;　**修订日期**:2017-08-28

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: ymchen@ fjnu.edu.cn

the soil pore-size and permeability, which greatly promoted Fe^{3+} and Al^{3+} leaching and decreased Na^{+} and Mg^{2+} concentrations in the surface soil. The interaction between warming and N addition may have a combined effect that is more than the simple addition of a single factor. Therefore, further long-term monitoring to understand the internal mechanism of soil nutrient response to future climate change is needed.

Key Words: warming; nitrogen addition; soil solution; nutrient dynamics

增温和氮沉降是现今乃至未来全球气候变化的两大趋势。增温,氮沉降等气候变化会改变陆地生态系统的生物地球化学循环过程,如改变植物初级生产力[1-2],微生物群落结构[3],土壤呼吸和土壤氮矿化[4],还可引起养分元素供应失衡等诸多生态问题[5]。其中对土壤养分循环的影响尤其受到国内外的关注[6-8]。

森林养分的动态检测大多以土壤为研究对象[9-11],而采用原位采集土壤溶液的研究较少。土壤溶液中养分浓度的高低可以更加清楚地反映土壤养分的供应状况和作物吸收养分的难易程度。土壤溶液组分被认为是森林生物地球化学循环过程的敏感指标,其能快速响应周围环境的干扰和变动[12]。土壤溶液无机组分一直都是土壤养分动态检测的重要指标,其对植物生长至关重要。矿质元素如钾(K)、镁(Mg)、钙(Ca)、铁(Fe)均为植物生长的必需矿质元素,钠(Na)、铝(Al)为植物有益元素。矿质元素含量变化能在一定程度上影响植物的生理和生长特性[11]。可溶性有机质(dissolved organic matter,DOM)普遍存在于陆地和水生生态系统[13],是土壤溶液中关键而敏感的有机组分。虽然其占土壤有机质的比例小于5%,但其活性高,在养分周转中起桥梁作用,直接反映土壤养分状态。DOM是植物根系获取养分的直接来源,并能为微生物的新陈代谢提供能源物质[14-15]。

增温、氮沉降等气候变化对土壤溶液组分的影响因不同生态系统而异,可促进或抑制土壤溶液无机组分含量[16-20]。Lu 等[21]在鼎湖山的研究表明,施氮降低了土壤中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 的含量,但对 Na^{+}、K^{+} 离子的含量无显著影响。Mao 等[22]进一步研究表明,长期的施氮使土壤 K^{+} 离子含量也有所降低。而 D′Orangeville 等[9]在加拿大魁北克的研究表明,施氮对森林土壤中 K^{+}、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等离子的含量无显著影响,增温可增加土壤中 K^{+} 离子的含量。已有研究表明增温可通过提高土壤微生物的活性[23],加速了化学反应速率,影响植物的新陈代谢以及内部养分元素的分配[24-25],进而影响土壤养分利用率及存储。施氮可使土壤中硝化作用增强,增加 H^{+},使 NO_3^{-} 量淋溶,降低土壤 pH,影响土壤基础阳离子从矿物中释放[26-27]。氮沉降可通过一系列物理化学过程严重影响微量元素的可移动能力[10]。此外,增温,施氮对 DOM 的输入和输出过程也受到国际广泛关注[17-18]。

气候变迁是气候变暖和氮沉降等气候条件多重影响的结果,或许我们更加关注的是双因子交互作用。李博等[28]对叶片矿质元素的研究就表明增温和施氮对 K^{+}、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等离子均存在明显的交互作用,我们前期对土壤溶液的监测也显示双因子交互作用可能并不是单因子影响的简单叠加[29]。增温,施氮对养分元素循环过程的影响十分复杂,交互作用的影响机制需要更多的探索。

本研究在福建三明森林生态系统与全球变化研究站对杉木幼苗小区土壤溶液进行了两年的动态观测。其主要目的在于探究增温、施氮及增温+施氮双因子交互作用对土壤溶液有机组分及无机组分的影响。通过本研究了解土壤溶液养分对当前气候变化的响应,可为维持和提升林地土壤养分提供极大的理论依据。同时可对气候变迁下土壤养分响应趋势做初步估算,具有一定的现实意义。

1 材料和方法

1.1 试验地区概况

试验地位于福建三明森林生态系统与全球变化研究站(26°19′N,117°36′E),平均海拔 300m,平均坡度 27.5°—35°,属中亚热带季风气候,年均温 19.1℃,年均降雨量 1749mm,年均蒸发量 1585mm,相对湿度 81%,

土壤为黑云母花岗岩发育的红壤,pH 为 4.6—5.3[25]。研究区日均气温及日降雨量图如图 1。

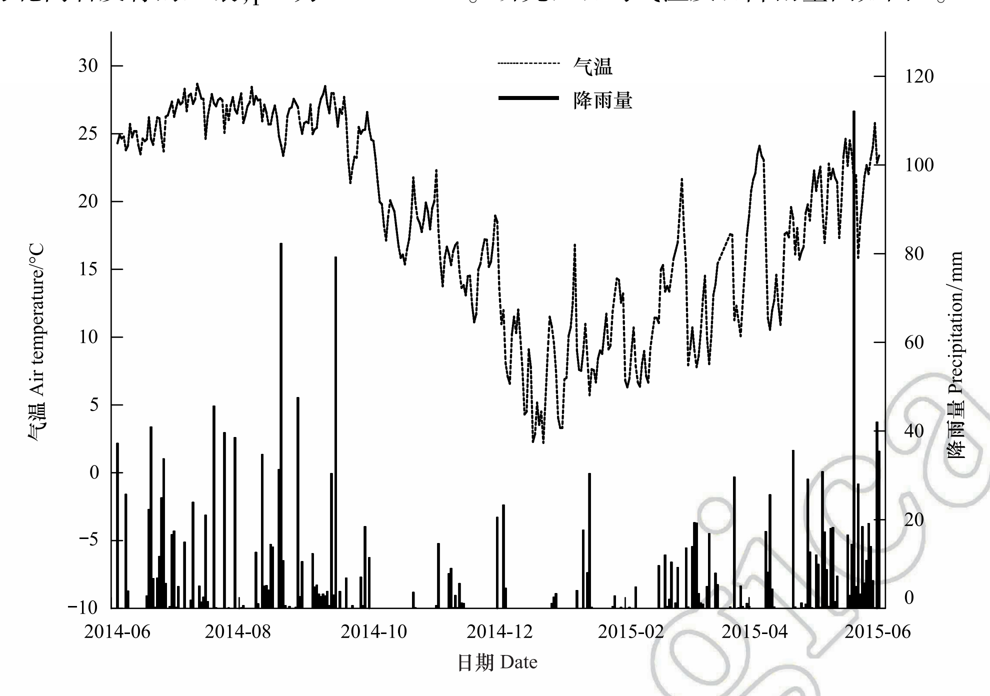


图 1　研究区日均气温及日降雨量(2014 年 6 月—2015 年 5 月)

Fig.1　Daily mean air temperature and precipitation at study area during this study period (from June 2014 to May 2015)

1.2　实验方法

1.2.1　实验设计

在试验地设置 30 个 2m×2m 的小样方,设置土壤增温(增温、不增温)×施氮(不施氮、施低氮、施高氮)双因子试验,包括对照(CT,不增温不施氮)、增温(W,+5℃)、低氮(LN,40kg N hm^{-2} a^{-1})、高氮(HN,80kg N hm^{-2} a^{-1})、低氮+增温(WLN)、高氮+增温(WHN),共 6 种处理,每种处理各 5 个重复,每个重复都有做挖壕沟处理。

土壤增温在增温小区土壤 10cm 深处布设增温电缆,采用自主研发 PID 土壤主动增温控制系统,增温幅度为 5℃。增温小区比对照小区温度高 5℃,当温度差小于 5℃时,土壤开始增温,温差达到 5℃时,增温停止。同时每个小区内温度、水分传感器等设备均有相应布设[25,30]。施氮采用人工喷洒 NH_4NO_3(分析纯)溶液的形式,即在每月月初分别称取 3.6、7.2g 的 NH_4NO_3溶于 800mL 去离子水中。将配置好的 NH_4NO_3溶液倒入喷壶中,模拟林冠氮沉降,分别在 LH 和 HN 小区(林冠上)来回喷洒均匀 3—4 次,同时在 CT 小区用同样方法喷洒等量的去离子水[29]。杉木幼苗于 2013 年 11 月栽植,每个样方 4 株。

1.2.2　土壤溶液采集

分别在每个实验小区壕沟内 15、30、60cm 处布设土壤溶液取样器(suction lysimeter,SM32),定期原位采集土壤溶液。于 2014 年 5 月—2016 年 4 月进行溶液采集,采样频率为 1 个月 1 次。采集方法为负压法[29],即用真空泵将土壤溶液取样器抽成近真空状态,待 24h 后再将水样抽出。

1.2.3　测定项目与方法

土壤溶液从野外带回后立即使用 0.45μm 滤膜抽滤,所得溶液即 DOM 溶液。溶解性有机碳(dissolved organic carbon,DOC)浓度用总有机碳分析仪(TOC-L CPH/CPN,日本)测定,溶解性总氮(Dissolved total nitrogen,DTN)、总溶解性无机氮(NO_3^-、NH_4^+)使用连续流动分析仪(Skalar san++,荷兰)测定。溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen,DON)为溶解性总氮与总溶解性无机氮的差值。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Perkin Elmer Optima 8000DV)测定土壤溶液中 K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}离子浓度(mg/L);使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo Xseries 2)测定土壤溶液中 Fe^{3+}和 Al^{3+}浓度(μg/L)。

酸中和能力(acid neutralising capacity forcing,ANC Forcing)可用以衡量土壤溶液潜在的酸诱导力,其计算公式[19]如下:

$$ANC\ Forcing = \Delta NH_4^+ - \Delta NO_3^- \quad (1)$$

式中,ΔNH_4^+ 为各样品 NH_4^+ 浓度与对照组 NH_4^+ 年平均浓度的差值;ΔNO_3^- 为各样品 NO_3^- 浓度与对照组 NO_3^- 年平均浓度的差值,单位微单量/升。

1.3 数据分析

采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较处理之间的差异。利用 Origin 9.0 软件作图。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果

2.1 土壤溶液中溶解性总氮(DTN)和硝态氮(NO_3^-)

图 2 中,施氮对 3 个土层土壤溶液 DTN 均无显著影响,但增温及增温+施氮对 DTN 则有显著促进作用。增温处理下 DTN 的增加幅度范围是对照的 1.2—1.9 倍;增温+施氮处理下 DTN 浓度可达对照的 1.2—2.23 倍。增温及增温+施氮显著增加了各土层 NO_3^- 浓度,增温对 NO_3^- 的增加幅度范围是对照的 1.5—2.6 倍;增温+施氮对 NO_3^- 浓度最高均可达对照的 1.64—2.2 倍。土壤溶液 NO_3^- 浓度对施氮的响应与 DTN 浓度一致,并无显著的促进,仅在 0—15cm 土层高氮对 NO_3^- 浓度呈现显著促进作用。

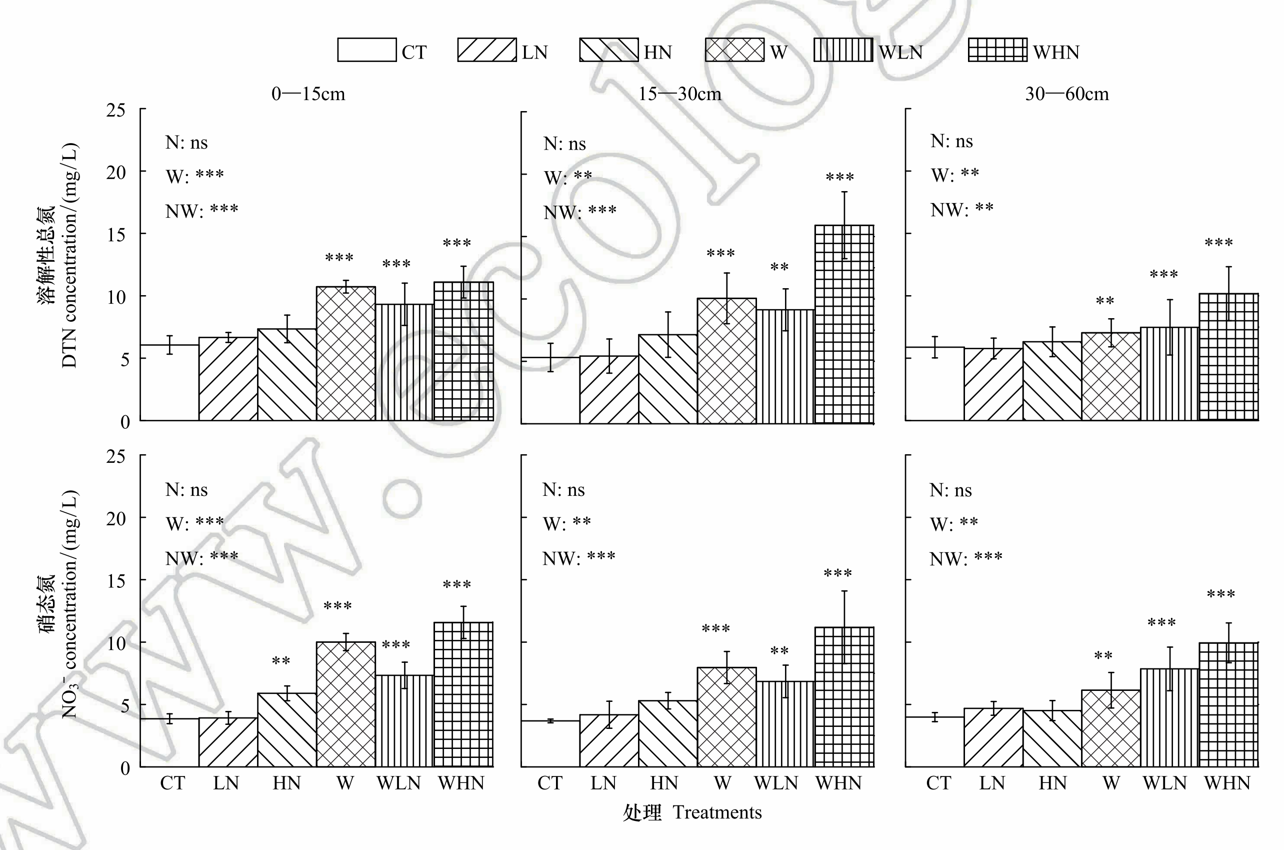


图 2 增温和施氮下土壤溶液 DTN 和 NO_3^- 浓度(2014 年 4 月—2016 年 4 月)

Fig.2 The concentrations of DTN and NO_3^- in soil solution in warming and nitrogen addition treatments from April 2014 to April 2016

CT:对照,Control;W:增温,Warming;LN:低氮,Low nitrogen;HN:高氮,High nitrogen;WLN:低氮+增温,Warming and low nitrogen;WHN:高氮+增温,Warming and high nitrogen;N:施氮效,Nitrogen addition effect;W:增温效应,Warming effect;WN:增温和施氮交互效,Interaction effect of warming and nitrogen addition;ns:没有显著差,No significant differences;不同处理之间的差异性用*表示:* $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$

2.2　土壤溶液中 Fe^{3+},Al^{3+}含量

图 3 中,各处理对 15cm 以下 Fe^{3+}、Al^{3+}含量的影响较为显著,增温显著降低了 15—30cm 中间土层 Fe^{3+}、Al^{3+}含量,对表、底两层无显著影响。施氮显著增加了 15cm 以下土层 Fe^{3+}含量,对各土层 Al^{3+}均无显著影响,仅高氮对 15—30cm 土层 Al^{3+}有显著抑制作用。增温+施氮均显著促进了 30—60cm 底层 Fe^{3+}、Al^{3+}含量的增加,抑制了 15—30cm Fe^{3+}含量。整体而言,增温+施氮对 15—30cm 土层 Al^{3+}含量无显著影响,由于增温+低氮和增温+高氮对其的作用出现一促进,一抑制的趋势。对照处理 Fe^{3+}、Al^{3+}含量随土层加深呈现先增后降的趋势,而增温及增温+施氮后 Fe^{3+}、Al^{3+}含量随土层先降后升,尤其是增温+施氮。

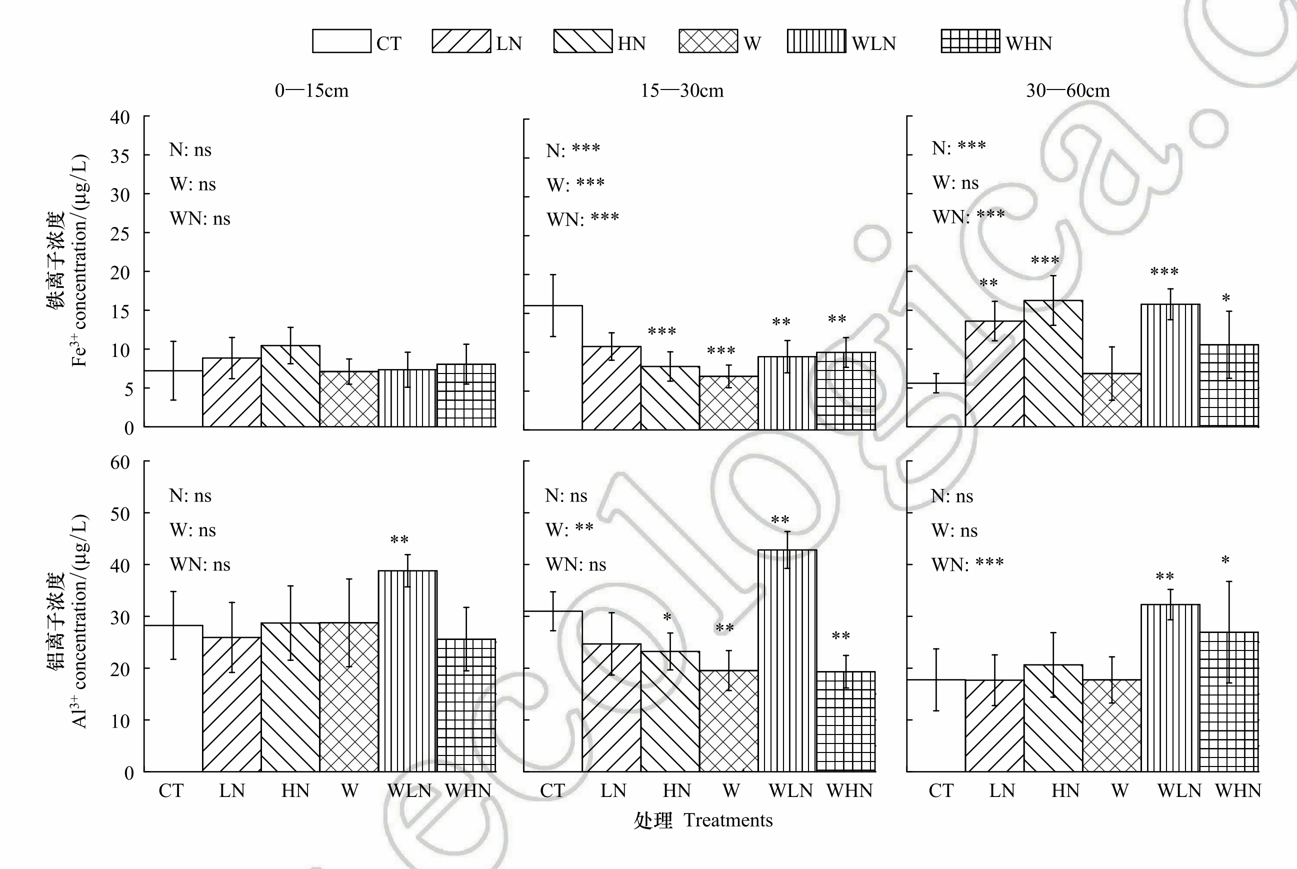


图 3　增温和施氮对土壤溶液 Fe^{3+}和 Al^{3+}浓度影响

Fig.3　The effects of warming and nitrogen addition on the concentrations of Fe^{3+} and Al^{3+} in soil solutions

2.3　土壤溶液 K^{+}、Ca^{2+}、Na^{+}、Mg^{2+}含量

表 1 中,增温显著增加 15—30cm 土层 K^{+}离子含量,降低表层 Mg^{2+}离子含量。施氮及增温+施氮对溶液 K^{+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}含量均无显著影响。各处理均降低溶液 Na^{+}离子含量,尤其对表层 Na^{+}离子有极显著的抑制作用,其中增温及增温+低氮表层 Na^{+}含量分别为对照的 28.5%和 47.4%。

2.4　土壤溶液 DOM 浓度

表 2 中,增温,施氮及增温+施氮均显著降低了表层土壤溶液 DOC 浓度,其中施氮对 DOC 浓度的抑制作用大于增温,低氮及高氮对表层 DOC 浓度均值分别降低了 39.7%,34.2%。增温+低氮和增温+高氮对表层 DOC 浓度降低比例与施氮相当,分别为 37.2%,37.8%。随土层加深,高氮对底层 DOC 浓度抑制作用依旧显著。增温、施氮对各土层 DON 浓度均无显著影响,但增温+施氮对 DON 浓度呈现显著促进作用。增温+低氮在 0—15,30—60cm 土层的 DON 浓度分别是对照的 1.7,1.8 倍。增温及施氮单因子均对 DOC∶DON 无显著影响,但增温+施氮却显著降低了表层 DOC∶DON。

表 1 增温和施氮对土壤溶液 K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+} 含量影响

Table 1 The effects of warming and nitrogen addition on the concentrations of K^+, Ca^{2+}, Na^+ and Mg^{2+} in soil solutions

指标 Indicators	土层/cm Soil layers	CT	LN	HN	W	WLN	WHN	N	W	WN
K^+	0—15	0.75(0.09)	0.82(0.11)	0.90(0.34)	0.74(0.21)	0.74(0.06)	0.86(0.24)	ns	ns	ns
	15—30	0.74(0.14)	0.74(0.15)	0.70(0.06)	0.93(0.11) *	0.78(0.1)	0.77(0.07)	ns	**	ns
	30—60	1.19(0.25)	0.69(0.11) *	1.09(0.42)	0.86(0.11)	0.77 * (0.14) *	0.94(0.41)	ns	ns	ns
Ca^{2+}	0—15	16.63(8.1)	12.55(6.29)	11.01(8.78)	10.90(3.93)	9.92(6.05)	9.80(4.43)	ns	ns	ns
	15—30	11.89(7.91)	8.01(1.83)	6.34(1.34)	6.84(0.64)	12.78(3.91)	11.71(3.74)	ns	ns	ns
	30—60	15.20(8.1)	12.59(7.57)	18.46(9.03)	13.39(6.74)	13.30(7.02)	15.14(4.75)	ns	ns	ns
Na^+	0—15	5.40(1.06)	3.68(1.81) *	3.04(0.79) **	1.54(0.12) ***	2.56(0.77) **	3.84(1.39)	**	***	**
	15—30	3.29(2.04)	2.52(0.60)	2.65(0.28)	2.07(0.38)	2.85(0.80)	3.48(0.54)	ns	ns	ns
	30—60	3.26(1.64)	2.54(1.26)	4.10(0.56)	3.47(1.52)	1.87(0.58)	3.95(1.82)	ns	ns	ns
Mg^{2+}	0—15	0.73(0.17)	0.52(0.17)	0.67(0.14)	0.35(0.05) **	0.6(0.13)	0.54(0.24)	ns	**	ns
	15—30	0.88(0.39)	1.01(0.61)	0.66(0.21)	0.61(0.1)	1.10(0.47)	0.70(0.12)	ns	ns	ns
	30—60	1.23(0.57)	1.62(0.91)	2.20(1.42)	1.67(1.04)	1.3(0.23)	1.46(0.57)	ns	ns	ns

CT:对照,Control;W:增温,Warming;LN:低氮,Low nitrogen;HN:高氮,High nitrogen;WLN:低氮+增温,Warming and low nitrogen;WHN:高氮+增温,Warming and high nitrogen;N:施氮效,Nitrogen addition effect;W:增温效应,Warming effect;WN:增温和施氮交互效,Interaction effect of warming and nitrogen addition;ns:没有显著差,No significant differences;不同处理之间的差异性用 * 表示: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$

表 2 增温和施氮对土壤溶液 DOC,DON 和 DOC:DON 影响

Table 2 The effects of warming and nitrogen addition on the contents of DOC, DON and DOC:DON in soil solutions

指标 Indicators	土层/cm Soil layers	CT	LN	HN	W	WLN	WHN	N	W	WN
DOC	0—15	8.91(0.90)	5.37(0.94) ***	5.86(0.79) ***	7.27(0.66) **	5.59(1.06) ***	5.54(0.58) ***	***	**	***
	15—30	5.32(0.75)	4.65(0.47)	4.30(0.33) *	5.23(0.78)	6.68(0.79) **	5.02(0.71)	ns	ns	ns
	30—60	4.48(0.77)	4.09(0.49)	3.56(0.45) *	4.63(0.33)	4.08(0.53)	4.39(0.67)	*	ns	ns
DON	0—15	1.00(0.09)	1.13(0.18)	0.82(0.09)	1.01(0.21)	1.69(0.69) *	1.37(0.61)	ns	ns	*
	15—30	1.79(0.52)	1.38(0.22)	1.46(0.41)	1.33(0.53)	1.37(0.52)	2.21(0.38)	ns	ns	*
	30—60	0.96(0.2)	1.21(0.53)	1.28(0.42)	1.42(0.53)	1.72(0.84) *	1.74(0.39) *	ns	ns	*
DOC:DON	0—15	20.42(2.88)	16.9(3.22)	19.67(3.38)	16.32(3.28)	10.06(2.43) ***	13.44(5.73) **	ns	ns	***
	15—30	13.07(2.44)	11.73(4.04)	9.43(1.99) *	10.51(1.77)	13.55(1.86)	8.98(1.45) *	ns	ns	ns
	30—60	11.64(2.77)	10.28(3.34)	10.46(1.96)	9.73(1.99)	11.43(1.35)	11.11(2.60)	ns	ns	ns

DOC:溶解性有机碳,dissolved organic carbon;DON:溶解性有机氮,dissolved organic nitrogen

2.5 土壤溶液酸中和能力

图 4 中,施氮对土壤溶液 ANC Forcing 无显著影响,仅在 0—15cm 土层低氮显著促进了 ANC Forcing,而高氮处理下 ANC Forcing 出现负值。增温及增温+施氮各土层 ANC Forcing 均为负值,且在负方向有显著增强。

3 讨论

3.1 土壤溶液养分对增温的响应

温度条件影响土壤溶液养分浓度及含量,可调节植物根系对土壤养分的吸收和同化,影响植物的新陈代谢以及内部养分元素的分配,使各元素在植物器官中进行转移和重新分配,对植物的生长发育起着关键的作用[11]。较早的研究已表明温度升高将促进有机质分解,增强其矿化及硝化作用,导致 NO_3^- 浓度升高[31]。本研究中增温显著增加了各土层土壤溶液中的 DTN 及 NO_3^- 浓度(图 2)。傅民杰等[32]研究表明增温降低土壤含水量,增加土壤透气性,因而有利于有机氮矿化。增温将导致一些盐类随温度的升高溶解度增大,导致土壤胶体的吸附力减弱,使一部分吸附性离子被解吸附[31],进而使转入土壤溶液中的 NO_3^- 浓度增加。

随着 NO_3^- 浓度的增加,增温处理下 DOC 浓度显著降低(表 2)。已有研究表明增温通过促进土壤矿化,硝

化等途径可增加土壤溶液 DOM 的分解及耗损[33]。增温可通过影响微生物活性或酶活性,进而影响 DOM 分解的内部生物机制。Ziegler 等[34]研究表明增温通过促进或抑制土壤酶活性,可改变土壤剩余底物及微生物量。土壤剩余底物及微生物量的变动直接改变微生物分解 SOM 的模式[35-36]。由于微生物量及土壤酶活性增加,有机质的分解转化速率将提高,反之则降低[37]。本研究中增温对底层 DOC 与 DON 均无显著影响,与 Kane 等[38]的研究结果一致,可能是深层根系微生物和根系减少的结果。

矿质元素对植物生长至关重要,植物生长过程中必须的矿质元素含量变化能在一定程度上影响植物的生理和生长特性[39]。Sanchez 等[40]研究显示,长期的土壤温度升高能加速土壤的风化和分解速率,降低土壤有机质的含量,这些改变将会使土壤转向以铁、铝氢氧化物为主,钙、镁、铜等含量较低的高度风化粘土,并且土壤维持养分的能力也随之降低。增温使土壤溶液中 DOC 浓度显著降低,表层 Na^+、Mg^{2+}含量显著降低,但 15—30cm 中间层 Fe^{3+}、Al^{3+}含量反而显著降低(图 3)。安思危等[41]对常绿阔叶林的研究发现,土壤层对各离子的截留能力和降雨量有很大的关系。本研究区位于亚热带地区,降雨较为充沛,同时由于增温土壤孔隙度增大,而 Fe^{3+}、Al^{3+}易于淋溶下渗,迁移到更下层,同时表层 Na^+、Mg^{2+}离子含量显著降低(表 1)。另一方面,增温可能导致植被对矿质元素的选择性吸收,江肖洁等[11]研究表明增温处理下不同种类的植被 Al^{3+}含量均有明显升高,与本研究土壤溶液中 Al^{3+}含量整体呈下降趋势相符。

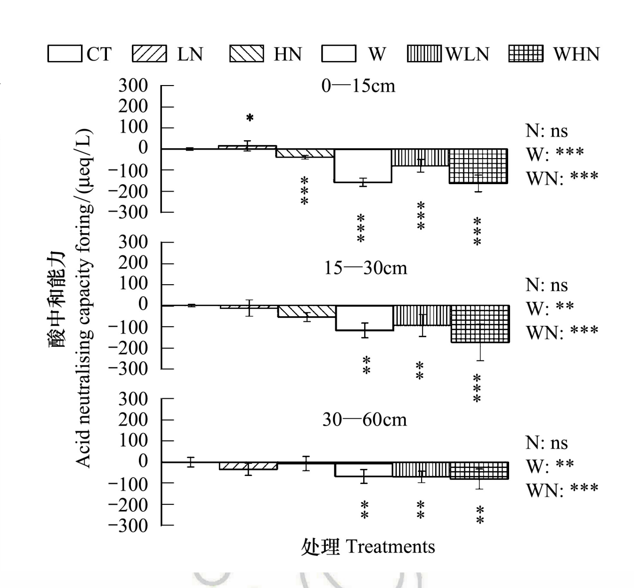


图 4　增温和施氮对土壤溶液酸中和能力的影响

Fig. 4　The effects of warming and nitrogen addition on acid neutralising capacity forcing in soil solutions

3.2　土壤溶液养分对施氮的响应

氮沉降可改变生态系统的碳、氮循环,作为一种物质输入,直接影响土壤溶液养分动态。前期研究结果表明施氮可能主要是通过抑制土壤碳矿化和刺激植物生长等途径显著降低土壤溶液 DOC 含量[29]。本研究中施氮对各土层土壤溶液 DTN,NO_3^-有促进但均无显著增加(图 2),施氮处理下尤其是高氮输入导致植被生长旺盛(未发表数据)。因此,土壤溶液中的氮素极可能被植物作为营养物质大量地吸收利用。土壤溶液是植物根系获取养分的源泉[42],研究表明土壤有效氮的增加,可为植物生长提供充足的养分[43]。在一定量范围内的氮沉降有利于植物的光合作用,增加植物生产力[44]。有研究表明施氮不但有利于亚热带典型常绿阔叶林主要树种叶片其叶绿素含量的增加,同时促进其蛋白质的合成[45]。乔俊等[46]对水稻田溶液的研究也表明施氮肥对土壤溶液矿质态氮含量影响较小,而作物氮素累积量显著增加,主要原因在于水稻对养分吸收能力提高。此外,当氮源充足时,还极可能最大限度地促进地上植被对其他营养元素的吸收。本研究仅显示施氮促进了植物对 Na^+的吸收(表 2)。Na^+能提高植物吸水吸肥的能力,促进细胞体积的增大和细胞数目的增多以及提高植物光合作用,进一步促进植被生长。

过量氮输入,将导致土壤 pH 值下降,使土壤基础阳离子加速从矿物中释放进入土壤溶液,增强 Fe^{3+}、Al^{3+}等阳离子的流动性[5,27]。安思危等[41]研究表明湿沉降导致土壤渗滤液 pH 值升高,伴随着溶液中 Ca^{2+}、Mg^{2+}等盐基离子质量浓度的显著增加。本研究中短期施氮量尚未造成土壤酸化,pH 值没有显著变化,同时施氮对各土层土壤溶液 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}含量均无显著影响(表 2),D′Orangeville 等[9]的研究数据也显示 3 年施氮后样地 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等离子通量无显著变化。但本研究中高氮处理下 15—30cm 土层 Fe^{3+}、Al^{3+}等离子显著降低,可能是 ANC Forcing 显著降低有关。有研究表明酸中和能力 ANC Forcing 与 pH 具有高度相关性,施用无机氮肥可显著降低土壤 ANC Forcing,其在指示土壤的酸碱程度上较 pH 更为灵敏[19]。而本研究高氮处理下 15—

30cm Al^{3+}浓度呈现显著降低，表明施氮促进了植物对 Al^{3+}的吸收，是长期氮沉降可能造成铝毒害的一个微小的征兆。土壤溶液中的 Al^{3+}绝大部分来源于土壤固相 Al^{3+}的活化，活性 Al^{3+}离子被植被吸收后会对植被根系产生毒害作用[47]，对植物的生产力产生负作用[11,48-49]。短期铝毒害对植物体没有明显的影响，长期反应可能对植物生长呈现抑制作用。

3.3 土壤溶液养分对增温+施氮的响应

气候变迁是增温和氮沉降等气候条件相互影响的结果，研究增温+施氮交互作用可对自然界气候环境进行有效模拟。增温+施氮交互作用是增温和施氮单因子双重作用的结果，同时存在主次效应之分[20,50]。前期研究结果表明增温+施氮交互作用对土壤溶液 DOC 的影响主要以施氮为主[29]。本研究结果显示在增温+施氮交互作用对土壤溶液氮素及矿质元素含量的影响中，增温占据主导地位。增温对土壤溶液氮素及矿质元素远大于施氮，这与凋落物中的矿质元素对增温和施氮的响应较为接近。前期[20]研究已表明增温可加速生态系统的元素循环，显著促进凋落物矿质元素释放，而施氮则无显著影响。

施氮在一定程度下可促进增温对氮素及矿质元素的影响，即增温+施氮交互作用下土壤溶液养分含量变动更加剧烈，其含量增降幅均高于增温，施氮单因子。如增温+施氮各土层土壤溶液 DTN 及 NO_3^- 浓度最高，其趋势为增温+施氮>增温>施氮；DOC 含量降低幅度最大；ANC Forcing 显著向负方向增强。以上表明增温+施氮交互作用下土壤硝化及矿化作用加剧，降低土壤酸中和能力，可能导致土壤内部不稳定因素的增加。此外，施氮可对增温效应产生一定的缓和调节作用。李博等[28]研究表明增温显著抑制羊草对矿质养分元素的吸收，而施氮可缓解增温对植被离子吸收的负效应。本研究增温+高氮交互作用对溶液各土层 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}含量均无显著影响(表 2)，说明增温和施氮两种叠加效应可对土壤溶液矿质元素养分动态有一定的平衡调节作用。增温+施氮处理下 Fe^{3+}、Al^{3+}含量中间层显著降低，而 30—60cm 底层显著增加，施氮可能缓解了增温对 Fe^{3+}、Al^{3+}的淋溶，至 30—60cm 底层不再下渗，此现象也可间接反映增温对 Fe^{3+}、Al^{3+}垂直迁移具有内在影响。

4 结论

(1)增温促进矿物质分解，促进土壤硝化，矿化进程，使表层 DOC 大量耗损，而各土层 DTN 及 NO_3^- 等速效养分显著增加；同时增温创造了透气的土壤环境，导致土壤养分易于下渗流失，表层 Na^+、Mg^{2+}含量显著降低。

(2)短期施氮尚未造成土壤酸化，未打破土壤生态系统的养分平衡状态。氮源充足时可极大地促进了地上植被生长对 NO_3^-、Na^+等营养元素的吸收，促进植物生长，同时对 Al^{3+}的吸收也有所增加，长期施氮可能将造成铝毒害危险。

(3)增温+施氮交互作用对土壤溶液各养分的影响受单因子的影响效应不同。一方面，增温和施氮可对土壤溶液养分动态起平衡调节作用，如维持土壤溶液矿质元素正常含量。另一方面，增温+施氮交互作用下导致土壤硝化及矿化作用加剧，叠加效应显著。

参考文献(References)：

[1] Hutchison J S, Henry H A L. Additive effects of warming and increased nitrogen deposition in a temperate old field: plant productivity and the importance of winter. Ecosystems, 2010, 13(5): 661-672.

[2] 李化山, 汪金松, 刘星, 蒋思思, 张春雨, 赵秀海. 模拟氮沉降对太岳山油松林土壤呼吸的影响及其持续效应. 环境科学学报, 2014, 34(1): 238-249.

[3] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(9): 1443-1451.

[4] Biudes M S, Vourlitis G L. Carbon and nitrogen mineralization of a semiarid shrubland exposed to experimental nitrogen deposition. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(6): 2068-2073.

[5] 胡波, 王云琦, 王玉杰, 王彬, 张会兰, 郭平, 刘春霞. 模拟氮沉降对土壤酸化及土壤酸缓冲能力的影响. 环境科学研究, 2015, 28(3): 418-424.

[6] Reid J P, Adair E C, Hobbie S E, Reich P B. Biodiversity, nitrogen deposition, and CO_2 affect grassland soil carbon cycling but not storage. Ecosystems, 2012, 15(4): 580-590.

[7] Chen H, Li D J, Gurmesa G A, Yu G R, Li L H, Zhang W, Fang H J, Mo J M. Effects of nitrogen deposition on carbon cycle in terrestrial ecosystems of China: a meta-analysis. Environmental Pollution, 2015, 206: 352-360.

[8] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 李化山, 王娜, 赵博. 模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 88-94.

[9] D'Orangeville L, Houle D, Côté B, Duchesne L. Soil response to a 3-year increase in temperature and nitrogen deposition measured in a mature boreal forest using ion-exchange membranes. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(12): 8191-8202.

[10] 雒文涛, 乌云娜. 陆地生态系统微量元素循环及其对全球变化的响应: 进展与展望. 大连民族大学学报, 2016, 18(5): 443-449.

[11] 江肖洁, 耿春女, 韩建秋, 周玉梅. 增温对长白山苔原植物叶片和土壤矿质元素含量的影响. 生态学报, 2016, 36(7): 1928-1935.

[12] 孙明德, 刘宝存, 吴静, 倪小会. 原位土壤溶液采样技术的应用. 北京农业科学, 2001, 19(4): 31-33.

[13] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 刘文秀, 何玘霜, 杨晨, 杨斌, 孔祥臻, 徐福留. 溶解性有机质特性分析与来源解析的研究进展. 环境科学学报, 2016, 36(2): 359-372.

[14] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.

[15] Bolan N S, Adriano D C, Kunhikrishnan A, James T, McDowell R, Senesi N. Dissolved organic matter: biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils. Advances in Agronomy, 2011, 110: 1-75.

[16] McDowell W H, Magill A H, Aitkenhead-Peterson J A, Aber J D, Merriam J L, Kaushal S S. Effects of chronic nitrogen amendment on dissolved organic matter and inorganic nitrogen in soil solution. Forest Ecology and Management, 2004, 196(1): 29-41.

[17] Xu X K, Han L, Luo X B, Liu Z R, Han S J. Effects of nitrogen addition on dissolved N_2O and CO_2, dissolved organic matter, and inorganic nitrogen in soil solution under a temperate old-growth forest. Geoderma, 2009, 151(3/4): 370-377.

[18] Rappe-George M O, Gärdenäs A I, Kleja D B. The impact of four decades of annual nitrogen addition on dissolved organic matter in a boreal forest soil. Biogeosciences, 2013, 10(3): 1365-1377.

[19] Fröberg M, Grip H, Tipping E, Svensson M, Strömgren M, Kleja D B. Long-term effects of experimental fertilization and soil warming on dissolved organic matter leaching from a spruce forest in northern Sweden. Geoderma, 2013, 200-201: 172-179.

[20] 崔嘉楠, 陈玥希, 孙辉. 增温和增氮对红杉(*Larix potaninii*)新鲜凋落物矿质元素释放的影响. 四川农业大学学报, 2015, 33(2): 133-138, 173-173.

[21] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, Luo Y Q, Mo J M. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems. Global Change Biology, 2014, 20(12): 3790-3801.

[22] Mao Q G, Lu X K, Zhou K J, Chen H, Zhu X M, Mori T, Mo J M. Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest. Geoderma, 2017, 285: 57-63.

[23] Bell T H, Klironomos J N, Henry H A L. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 820-828.

[24] Williamson T J, Cross W F, Benstead J P, Gíslason G M, Hood J M, Huryn A D, Johnson P W, Welter J R. Warming alters coupled carbon and nutrient cycles in experimental streams. Global Change Biology, 2016, 22(6): 2152-2164.

[25] Zhang Q F, Xie J S, Lyu M, Xiong D C, Wang J, Chen Y, Li Y Q, Wang M K, Yang Y S. Short-term effects of soil warming and nitrogen addition on the N:P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* in subtropical regions. Plant and Soil, 2017, 411(1/2): 395-407.

[26] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 叶永昌, 刘颂颂, 徐国良, 倪杰. 模拟氮沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响. 生态学报, 2015, 35(5): 1422-1433.

[27] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 朱晓敏, 莫江明. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响. 生态学报, 2016, 36(16): 4965-4976.

[28] 李博. 温度升高和氮沉降对松嫩草地羊草种群生理与生态特性的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.

[29] 元晓春, 陈岳民, 袁硕, 郑蔚, 司友涛, 元志鹏, 林伟盛, 杨玉盛. 氮沉降对杉木人工幼林土壤溶液可溶性有机物质浓度及光谱学特征的影响. 应用生态学报, 2017, 28(1): 1-11.

[30] 蒲晓婷, 林伟盛, 杨玉盛, 杨智榕, 郑蔚, 元晓春, 刘小飞, 熊德成, 陈岳民. 杉木幼林土壤垂直剖面 CO_2 通量对土壤增温的响应. 环境科学学报, 2017, 37(1): 288-297.

[31] 刘瑞文, 陈世庆, 董振国, 鲁全国. 温度条件对麦田土壤溶液养分浓度的影响. 生态学报, 1993, 13(2): 164-170.

[32] 傅民杰, 王传宽, 王颖, 刘实. 四种温带森林土壤氮矿化与硝化时空格局. 生态学报, 2009, 29(7): 3747-3758.

[33] 杨智榕, 林伟盛, 蒲晓婷, 郑蔚, 元晓春, 刘小飞, 熊德成, 胥超, 林廷武. 土壤增温对杉木幼林不同深度土壤溶液 DOM 的影响. 亚热带资源与环境学报, 2015, 10(1): 91-94.

[34] Ziegler S E, Billings S A, Lane C S, Li J W, Fogel M L. Warming alters routing of labile and slower-turnover carbon through distinct microbial groups in boreal forest organic soils. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 60: 23-32.

[35] Yin R, Deng H, Wang H L, Zhang B. Vegetation type affects soil enzyme activities and microbial functional diversity following re-vegetation of a severely eroded red soil in sub-tropical China. CATENA, 2014, 115: 96-103.

[36] Frey S D, Ollinger S, Nadelhoffer K, Bowden R, Brzostek E, Burton A, Caldwell B A, Crow S, Goodale C L, Grandy A S, Finzi A, Kramer M G, Lajtha K, LeMoine J, Martin M, McDowell W H, Minocha R, Sadowsky J J, Templer P H, Wickings K. Chronic nitrogen additions suppress decomposition and sequester soil carbon in temperate forests. Biogeochemistry, 2014, 121(2): 305-316.

[37] Wang Y L, Yang C M, Li J H, Shen S. The chemical composition and source identification of soil dissolved organic matter in riparian buffer zones from Chongming Island, China. Chemosphere, 2014, 111: 505-512.

[38] Kane E S, Mazzoleni L R, Kratz C J, Hribljan J A, Johnson C P, Pypker T G, Chimner R. Peat porewater dissolved organic carbon concentration and lability increase with warming: a field temperature manipulation experiment in a poor-fen. Biogeochemistry, 2014, 119(1/3): 161-178.

[39] 毛庆功, 鲁显楷, 陈浩, 莫江明. 陆地生态系统植物多样性对矿质元素输入的响应. 生态学报, 2015, 35(17): 5884-5897.

[40] Sanchez P A. Properties and management of soils in the tropics. Soil Science, 1977, 124(3): 187-187.

[41] 安思危, 孙涛, 马明, 王定勇. 中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征. 环境科学, 2015, 36(12): 4414-4419.

[42] 宋静, 骆永明, 赵其国. 土壤溶液采样技术进展. 土壤, 2000, 32(2): 102-106.

[43] 袁颖红, 樊后保, 王强, 裘秀群, 陈秋凤, 李燕燕, 黄玉梓, 廖迎春. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响. 浙江林学院学报, 2007, 24(4): 437-444.

[44] 李德军, 莫江明, 方运霆, 彭少麟, Gundersen P. 氮沉降对森林植物的影响. 生态学报, 2003, 23(9): 1891-1900.

[45] 王致远, 赵广东, 王兵, 邓宗富, 夏良放, 陈传松. 丝栗栲、苦槠和青冈幼苗叶片光合生理指标对人工增温和施氮的响应. 水土保持学报, 2014, 28(4): 293-298.

[46] 乔俊, 汤芳, 朱励军, 颜廷梅, 赵冬, 王如海, 杨林章. 太湖地区水稻产量、根圈土壤矿质态氮及氮素径流损失对氮肥的响应. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2140-2145.

[47] 胡波, 王云琦, 王玉杰, 王彬, 张会兰, 郭平, 刘春霞. 模拟氮沉降对土壤酸化及土壤酸缓冲能力的影响. 环境科学研究, 2015, 28(3): 418-424.

[47] 傅柳松, 吴杰民, 杨影, 邱理均. 模拟酸雨对土壤活性铝释出影响研究. 环境科学, 1993, 14(1): 20-24.

[48] 应小芳, 刘鹏, 徐根娣. 土壤中的铝及其植物效应的研究进展. 生态环境, 2003, 12(2): 237-239.

[49] Zhao Y, Song K S, Li S J, Ma J H, Wen Z D. Characterization of CDOM from urban waters in northern-northeastern China using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(15): 15381-15394.

[50] 阿里穆斯, 庄丽, 席溢, 李亚伟, 高清竹, 黄永梅, 庞宗然, 崔箭. 模拟增温与氮沉降对蒙药阿给 12 种必需元素分配的影响. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1678-1683.